

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03574

研究課題名（和文）波動との相互作用によるイオンダイナミクスの複雑性の解明

研究課題名（英文）Clarification of the complexity of ion dynamics interacted with waves

研究代表者

池添 竜也（Ikezoe, Ryuya）

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：70582849

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高温磁化プラズマにおける複雑性を決める過程の理解を目指し、時系列データの複雑性解析を行った。ある特定の物理過程を強く反映した信号を如何に得るかが実験では重要となる。本研究では、高温ミラープラズマの特徴に着目し、波動との相互作用により磁力線に沿って輸送された高エネルギーイオン束を高い精度で計測した。クーロン衝突が支配的なプラズマでは見えなかった波動との相互作用を反映したイオンダイナミクスの複雑性を調べることに成功した。J-S統計的複雑性とB-P順列エントロピーによる評価が波動に感度があること、およびピッチ角散乱を通じた波動の影響でイオンダイナミクスの複雑性が変化することが実験で示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽風プラズマは非常に多スケールの乱流が発達しているためにストキャスティックな信号を示すと言われていますが、実験室プラズマではそうではありません。物理素過程と信号の複雑性についての理解を深めることで、多点計測が困難な宇宙プラズマで起きている現象と地上での実験結果とをリンクさせて解明したり、核融合炉の実現に求められる乱流輸送の理解へと繋げることが可能です。本研究では磁力線に沿って流れてくるイオンを高時間分解能で直接測定できる検出器とプラズマ実験装置を用い、波動がイオンの統計的複雑性に影響することを実験で初めて示しました。

研究成果の概要（英文）：We analyzed the complexity of time-series data with the aim of understanding the process of determining complexity in high-temperature magnetized plasmas. How to obtain a signal that strongly reflects a specific physical process is important in experiments. In this study, we focused on the characteristics of high-temperature mirror plasma and measured the high-energy ion flux transported along the magnetic field lines by interaction with waves with high accuracy. We have succeeded in investigating the complexity of ion dynamics, which reflects the interaction with waves that was not visible in plasmas dominated by Coulomb collisions. Experiments have shown that evaluation using Jensen-Shannon complexity and permutation entropy is sensitive to waves, and that the effects of waves through pitch angle scattering change the complexity of ion dynamics.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：複雑性 イオンダイナミクス 時系列データ解析 C-Hマップ 高エネルギーイオン アルペン波動 ピッチ角散乱 イオン検出器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

磁化プラズマ中の多彩な非線形現象の重要性が近年改めて認識されつつある。例えば、磁場閉じ込め核融合プラズマでは、長年研究されてきた異常輸送、帯状流や自己緩和配位の構造形成に加え、リミットサイクルを示す加熱応答や突発的現象、長距離相関などの新たな非線形現象が明るみになってきている。プラズマ乱流における多スケールの揺動の結合が本質と考えられており、数値シミュレーションではマクロ・メゾ・ミクロスケールをつなぐ多階層連結が、室内実験では乱流揺動計測・解析の深化が一つの潮流となっている。これらプラズマ乱流研究は特に日本が世界をリードしている領域である。

一方、波動は多くの宇宙プラズマ現象や核融合プラズマにおいて、特にプラズマの加熱や加速などのマクロなダイナミクスに根幹的な役割を果たしていることが知られている。ここで、乱流を位相相関のない波動の重ね合わせとして考えると、乱流と非線形現象との素過程を調べる意味においても、単独の波動とプラズマの複雑性との関係を調べるのが重要である。また、ある種の乱流は位相相関をもつため、複数の波動を考え、それらの位相相関と複雑性の関係を調べることも重要である。数値計算を用いた研究がなされている一方で、特に本研究で着目するイオン系では実験研究は一切ない。これら全体を俯瞰して導かれる本研究課題の核心をなす学術的「問い」は、「高温磁化プラズマの複雑性を決める素過程は何か？」である。

2013年頃から M.R. Brown 教授グループ (Swarthmore 大学) によりプラズマ現象に C-H 図が適用され始めた。スフェロマックでの MHD 乱流 (SSX 装置)、直線装置でのドリフト波乱流 (LAPD 装置)、および太陽風の発達した乱流状磁場揺動 (宇宙探査機) への適用例がある。我々は C-H 図を逆磁場ピンチ装置 RELAX に適用し、MHD 特性が大きく異なる特徴的な二つの放電領域では C-H 図上の点で表される状態が変化することを示した。

(T. Onchi et al., Physica Scripta 92, 055601 (2017)、プラズマ・核融合学会誌 2017 年 4 月号解説記事) 磁化プラズマへの C-H 図の適用という観点では以上が先行研究にあたるが、内容としてはまだ複雑系の C-H 図による分類に留まっており、また、イオン系の複雑性に着目した実験研究は未だない。C-H 図ではノイズを含んだ時系列データからでもカオス、ストキャステックなどの複雑性を識別することができる一方、C-H 図のみではその複雑性を生み出す素過程に関する情報は得られない。従って如何に良い信号 (特定の物理的意味を強く含む：今の場合、波動との相互作用により損失錐に散乱されたイオンの時系列など) を取得して、如何に相互作用を系統的に制御できるかが重要となっている。

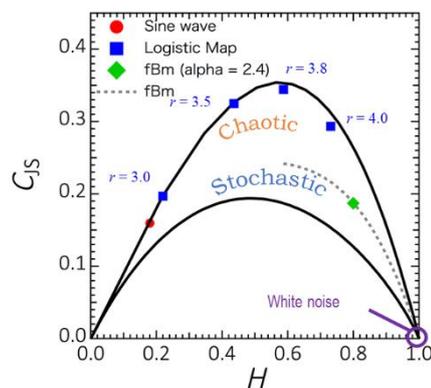


図1 C-H マップによる複雑性の分類

2. 研究の目的

多自由度を持つプラズマが、どのような機構で少数自由度力学系のカオス挙動を示すのか、どのような場合に真にストキャステックになるのかわかっていない。この問いに迫る新しい方法として、複雑性を分解してイオン系の単純な波動粒子相互作用に着目し、優れた室内実験環境を構築することで、まず波動と相互作用するイオンのダイナミクスに潜む複雑性を世界で初めて明らかにすることを目的とする。制御性のある単一もしくは複数の波動とイオンとの相互作用に着目し、波動と相互作用するイオンのダイナミクスを高度に計測できる環境を、ミラー磁場閉じ込め高温プラズマ実験装置の特徴を活かして構築する。1. 磁力線に沿って無衝突で輸送されるイオンのエネルギーおよび磁力線に対するピッチ角を弁別した直接計測による速度空間での相互作用の情報取得、2. 非接触な詳細波動計測、3. 制御性のある外部励起波動をアクチュエータとして応答を調べる能動的手法、が本研究の根幹である。得られる時系列データに最新の統計的解析手法を適用し、波動と相互作用するイオンのダイナミクスに潜む複雑性を世界で初めて実験的に明らかにする。

波動と粒子の相互作用という観点では、様々な数値シミュレーション研究がなされているが、大振幅波動では準線形近似が扱えず、本研究のような初めての実験研究が望まれる。また、プラズマ乱流研究と本研究とは、進展した先に行きつく最終的な物理目標は同じであろうが、切り口が全く異なる。本研究では、乱流を構成もしくは相互作用している波を抽出し、その波を基軸として複雑性の理解にチャレンジする。また、乱流研究では、そのほとんどが電子集団のダイナミクスを見ている。計測され易い電子密度・電子温度・イオン飽和電流・電位の揺動には集団としての電子の密度・温度揺動が大きく寄与しているためである。本研究では無衝突のイオン系に着目することで、集団と個の分離を図る。

3. 研究の方法

本研究を実施できる唯一の装置である複合ミラー磁場プラズマ閉じ込め装置 GAMMA10 を用いて、以下のように研究を進める。図2に GAMMA10 装置における高エネルギーイオンの流れの概略を示す。ICRF 波動を用いたイオン加熱により、セントラル部で磁場に垂直方向のイオン温度は数

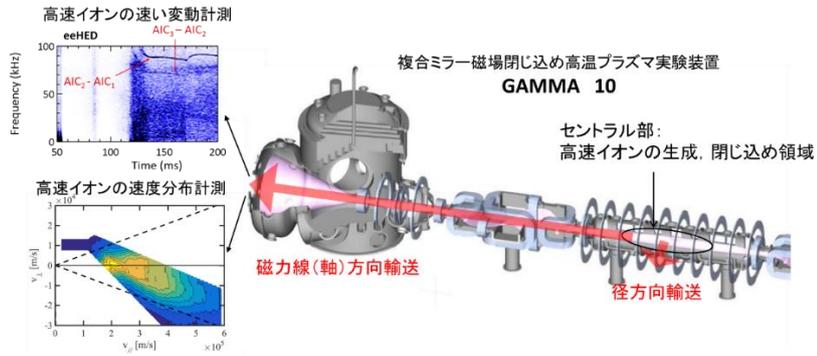


図2 GAMMA10 装置における高速イオンの流れの概略

keV に達する。垂直方向に加速されたイオンはミラー捕捉され、バウンス運動を行う。一方、一部のイオンは波動との相互作用により速度空間上で損失錐に散乱され、磁力線方向に輸送される。そして、装置端部に設置された高速イオン検出器でパルスとして検出される。このように室内実験で高エネルギーのイオンを生成でき、無衝突領域におけるダイナミクスが支配的な状況（波動・粒子相互作用の顕在化）において、そのイオンを直接精度良く計測でき、また複数の ICRF 加熱装置によるイオン加熱の制御が可能な装置は GAMMA10 のみである。

- (1) GAMMA10 において、同一磁力線上の波動とイオンを測れるように、開発済みの波動計測器とイオン検出器のアップグレードを行う。
- (2) イオン検出信号を扱えるように C-H 図 (C: Jensen-Shannon 統計的複雑性、H: Bandt-Pompe 順列エントロピー) 計算プログラムを拡張する。また、統計的複雑性 C に含まれるパラメータ D (:不均衡性) の効果を実際の信号で検討する。D と共に飛躍的に計算規模が大きくなるため、最適化を行う。
- (3) 高速イオン検出器のパルス波形自体がある種の影響を C, H パラメータに及ぼす可能性があるため、計算機上で様々な疑似波形を用いたテストを系統的に行い、パルス波形の C-H 解析結果への影響を明らかにする。
- (4) 波動を能動的にアクチュエータとして使い、相互作用するイオンのダイナミクスの応答を調べる。加熱電力のスキャン、周波数を変えることによる共鳴位置の変更などを、実験結果を考察しながら適宜実施する。さらに、ICRF 加熱装置の配位の工夫により最大 3 つの波動を用い、それらの位相関係を制御する実験を順次実施する。
- (5) 結果を考察しながら、イオン検出器のさらなる拡張 (エネルギー領域、検出粒子数および時間分解能に関して) を行う。また解析手法の改良、開発も行う。

4. 研究成果

- (1) 同一磁力線上の波動とイオンの同時計測環境の構築：端損失高エネルギーイオン検出器

GAMMA10 の磁場の開放端部であるエンド部に表 1 にまとめるイオン検出器が設置されている。eeHED は Al 薄膜を蒸着した半導体検出器で、6keV 以上の高エネルギーイオンを検出する。一つ一つのイオンパルスを評価する波高分析モードでなく、粒子束を電流モードで測り、比較的高時間分解能となる 100kHz までの時間変化をとらえることに成功している。十分にパイルアップされた信号強度の時系列データは、端損失される高エネルギーイオン束の量の時間変化と考えることができ、端損失につながる速度空間でのピッチ角散乱の情報を含んでいる。これまでにイオン温度の非等方性により自発励起される複数のアルペインイオンサイクロトロン (AIC) 波動 (5.5-6.0 MHz) の間の差の周波数を有する 80-100kHz 近傍の AIC 差周波数で、eeHED で計測した高エネルギーイオン束がバースト様に周期を持って吐き出されていることが見出されている。

新たに eeMCP と呼ぶ MCP を用いた高エネルギーイオン束検出器を開発した。図3に装置の概略図を示す。MCP を用いることで、eeHED のように電流アンプが必要なく、高速応答性を期待できる。入口コリメータ径を可変とし、MCP が飽和しない範囲において、粒子束を上げるための調整を可能にした。これは、より高エネルギー帯のイオンを

表 1 端損失イオン検出器の一覧

Unit Name	Energy analyzer type	Detector	Filtering type of energy	Features
ELIEA	Electrostatic ion retarding	electrode	LPF $E_i < 0 \sim 2$ keV	r_i & T_{ij} measurement Multiple arrays
eeHED	Evaporated film	Semiconductor (PIPS)	HPF $E_i > 6$ keV	compact
ELECA	Electrostatic $\pi/2$ cylinder	20ch MCP	BPF $E_i: 0.1 \sim 4$ keV	Velocity distribution measurement
eeMCP	Electrostatic ion retarding	1ch MCP	HPF $E_i > 0 \sim 10$ keV	Higher E_i than ELECA Larger MCP than ELECA Changeable location owing to compactness

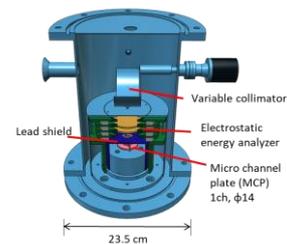


図3 高エネルギーイオン束検出器 eeMCP

計測する場合に、粒子束が減少し、時間応答性が検出される粒子束によって制限されるためである。これは、サンプリング時間内に十分な量のイオンが検出されていないと、有意義な物理情報が時間変化に含まれないためである。マルチグリッドを用いて静電エネルギー分析を行い、設定よりもエネルギーの高いイオンのみの粒子束を検出する。高エネルギーであることから2次電子リペラーを設置し、また、MCPが感度を持つX線の影響をできるだけ下げするために鉛シールドでMCPを囲っている。磁力線に沿って輸送されるイオンを検出するため、コリメータを通る視野には鉛シールドを設置できないが、開放端部の特徴としての曲がった磁力線構造により、直接セントラル部を望まない視野を確保しており、鉛シールドの穴を通るX線の影響は無視できる。静電エネルギー部とフィードスルーの耐電圧を途中強化し、最終的に0~10 kVのイオンリペラー電圧が印加可能となった。実験では、このコンパクトなeeMCPを取り付けるポートを数回変更して、径方向依存性の確認を行った。

ELECAは円筒電極によるエネルギー分解と多チャンネルMCPによるピッチ角分解により、端損失イオンの速度分布計測が原理的に可能である。この計測器を利用し、円筒電極に印加する電圧を時間的に掃引し、MCPの飽和を考慮して、掃引速度と信号を評価した。また、印加電圧とピッチ角の関係を評価し、端損失高エネルギーイオンの速度分布を得た。端損失束はロスコーン境界近傍が高い一方で、先に述べた波動との相互作用が顕著となるようなパラメータ領域においては、ゼロ度をピークとする分布が得られ、波動による大角度散乱が示唆された。

- (2) eeMCPを用いた端損失高エネルギーイオン束の空間、エネルギー依存評価

端損失イオン束をeeMCPの設置場所を変えて測定した。結果を図4に示す。eeHEDでの先行研究と同様に、AIC差周波で非定常に輸送される高エネルギーイオン束を測定した。ある差周波数で変動するイオン束の強度を縦軸にし、横軸はセントラル部のイオン温度の指標となる反磁性量である。反磁性量が高くなると、AIC波動ならびにその差周波揺動が自発的に励起され、端損失されるイオン束に高い強度の差周波揺動が観測されるようになる。eeHEDと同じ径方向位置 $R_{cc} = 10$ cmにおいても差周波揺動が観測されているものの、より中心領域の $R_{cc} = 4$ cmで今回初めて測定したところ、10倍近い強度での損失があることが明らかになった。AIC差周波揺動がセントラル部の径方向内側で強く局在化していることと矛盾しない。

また、eeMCPの下限検出エネルギーを変化させることで、輸送されるイオンのエネルギー毎にAIC差周波揺動強度を評価した。高イオン温度放電において、3つ観測されるAIC差周波揺動の内、一つは2.5 keV程度から観測されているものの、残り二つの揺動は比較的エネルギーが高い6 keV以上において観測された。これは、差周波揺動の周波数毎に端損失につながる相互作用をしているイオンエネルギーが異なることを明瞭に示している。

- (3) 同一磁力線上の波動とイオンの同時計測環境の構築：マイクロ波反射計による波動計測の高度化

マイクロ波反射計による波動計測の高度化を進め、アンテナの増設、密度分布測定用のFM反射計の整備等を実施した。多数アンサンブルを用いたバイスペクトル解析から内側領域においてのみ非線形励起されていることが示唆されていたAIC差周波揺動の絶対強度の径方向分布を初めて評価した。図5にAIC波動およびAIC差周波揺動強度の径方向分布を示す。密度は中心で $2 \times 10^{-18} \text{ m}^{-3}$ 程度であり、AIC差周波揺動は 10^{-3} オーダーの密度揺動レベルである一方、差周波揺動レベルは 10^{-4} オーダーである。またAIC波動が径方向に比較的ブロードな分布であるのに対し、AIC差周波揺動は $r < 8$ cmにおいてのみ観測され、中心に向かって増加する分布となっている。

また、方位角方向にずらしてセットとしたマイクロ波送受信アンテナペアを用いたマイクロ波反射計による同時計測から、AIC波動が方位角モード数 $m = -1$ である一方、差周波揺動が $m = 0$ であることが示された。したがって、二つのAIC波動とその差周波揺動が三波結合のマッチング条件を満たすことが確かめられた。

磁力線方向に並べたアンテナペアを用いた同時計測から、AIC波動が成長して定在波を形成している一方で、差周波揺動は有限の波数で伝搬する進行波であることが明らかになった。

- (4) ミラー閉じ込め高温プラズマのC-Hマップによる初めての特徴付け

GAMMA10において取得するイオン検出信号を扱えるようにC-H図(C: Jensen-Shannon 統計的複雑性、H: Bandt-Pompe 順列エントロピー) 計算プログラムを拡張し、統計的複雑性

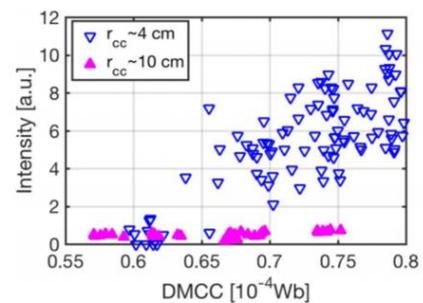


図4 差周波揺動起因の高エネルギーイオン損失の径方向依存

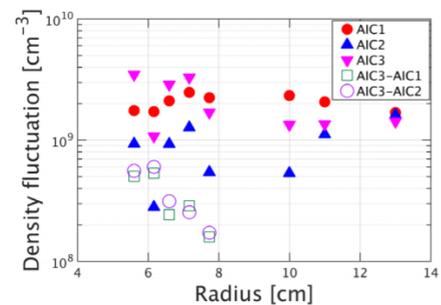


図5 差周波揺動強度の径方向分布

Cに含まれるパラメータD (:不均衡性)の効果の検討を通して、Dの最適化を行った。

高温ミラープラズマの最も代表的な放電においてマイクロ波反射計により径方向複数点での密度揺動時系列データを取得した。プラズマを相手とした反射計では、揺動計測時に振幅変調成分と位相変調成分が混同した生の信号が使われることが多い。GAMMA10に整備してきた反射計においては、真空容器内に設置した送受信アンテナを用いた良い条件における測定を通し、密度変動に対応する位相揺動成分のきれいな抽出に成功し、2点同時計測による相関解析に繋がっている。時系列データの複雑性を解析するために、できるだけ物理的意味合いがシンプルな位相変調成分を抽出した後の時系列データをここでは用いた。

図6に解析した放電時間全体でのC-Hマップを示す。図1に示す通り、上側黒太線に近いほどchaoticであり、下側黒太線に近いほどstochasticとなる。また真中の黒点線は自己相似性と長期依存を有する非整数ブラウン運動である。高温ミラープラズマは十分にchaoticと同定できる一方、温度と密度が高くなる中心領域において他とは異なる傾向がみられることが分かった。特に順列エントロピーが高い側にずれるのが特徴となっている。内側領域において強度が高くなるAIC差周波波動が関与している可能性はあるが、プラズマパラメータとAIC差周波波動との独立の制御が運転上困難であることからその同定には至っておらず、今後の課題である。

- (5) 無衝突イオン系で初となるC-Hマップによる複雑性の評価と波動の効果の顕在化

様々な放電状況下において、表1の各イオン検出器で得た時系列データへ複雑性解析を適用した。図7に反磁性量が大きく異なる二つの放電波形と、その時のセントラル部周辺静電プローブで取得したイオン飽和電流と、eeHEDで取得した6 keV以上の高エネルギーイオンの端損失失束の時系列データを対象にして解析したC、Hの時間発展を示す。多少のばらつきはあるものの、イオン飽和電流は二つの放電においてほとんど差がない。したがってイオン温度が大きく変わったとしても、磁化プラズマの全体(バルク)としての複雑性の性質は変わらないということが示される。ところが、eeHEDにおいて顕著な差異が現れた。同じデータをC-Hマップ上にプロットしたものを図7の最下部に示す。二つの放電ではAIC波動および差周波揺動の励起と非励起という波動としては大きな違いがある。波動の媒体として揺れているだけのイオン飽和電流を計る静電プローブ等には、複雑性に一切違いが現れず、波動粒子相互作用を受けたイオンのみを計っているeeHEDには大きな差が現れたと考えることができる。したがって、C-Hマップが波動との相互作用に感度があることが示されたと共に、イオン系で初めてとなる複雑性の評価ならびに波動との相互作用による複雑性の変化をとらえることができた。このように、特定の波動粒子相互作用を強く反映する時系列データの取得により、ピッチ角散乱を通じた波動の影響でイオンダイナミクスの複雑性が変化することが実験で示された。

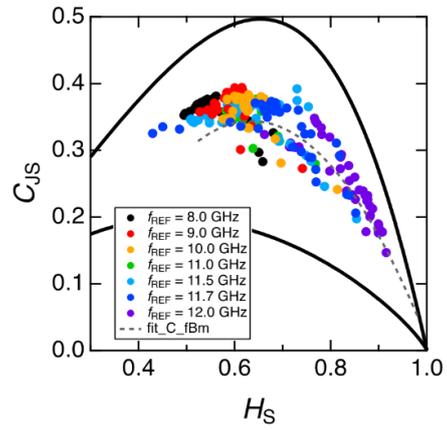


図6 高温ミラープラズマのC-Hマップ

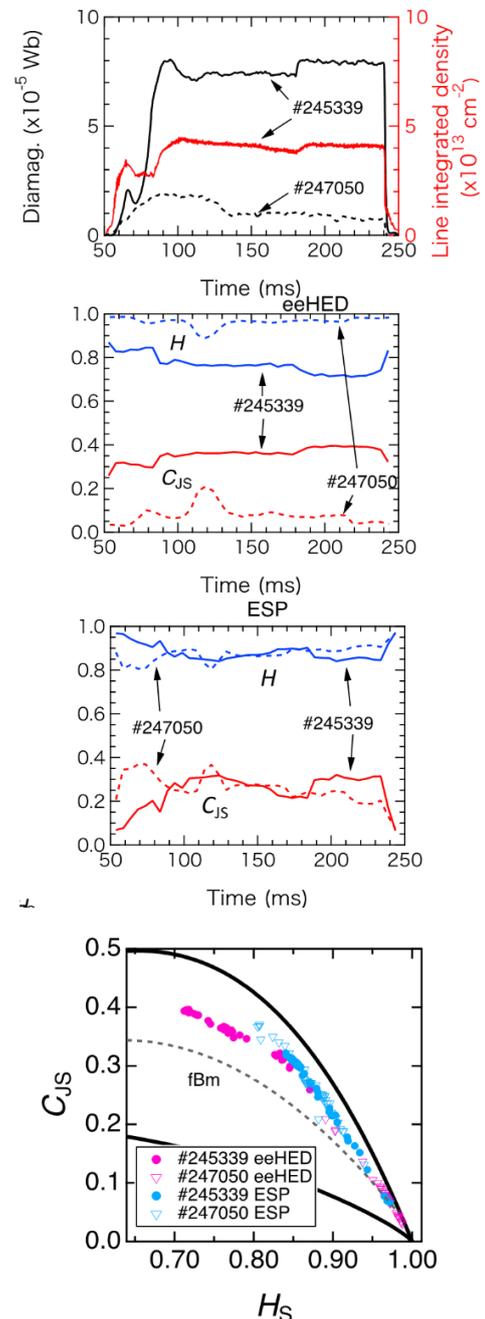


図7 波動との相互作用によるCH変動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Sekine R., Hirata M., Ikezoe R., Jang S., Kubota Y., Kayano H., Sugata K., Aizawa T., Noguchi D., Kim D., Sugimoto Y., Matsuura R., Yamazaki H., Ichimura M., Yoshikawa M., Kohagura J., Nakashima Y., Ezumi N., Sakamoto M.	4. 巻 92
2. 論文標題 Measurement of axial phase difference of density fluctuations owing to spontaneously excited waves by using microwave reflectometer on GAMMA 10/PDX	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 53506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0043821	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroki KAYANO, Seowon JANG, Mafumi HIRATA, Naomichi EZUMI, Hibiki YAMAZAKI, Kairi SUGATA, Takumi AIZAWA, Daichi NOGUCHI, Doyeon KIM, Yudai SUGIMOTO, Reina MATSUURA, Ryuya IKEZOE, Masayuki YOSHIKAWA, Makoto ICHIMURA and Mizuki SAKAMOTO	4. 巻 16
2. 論文標題 Observation of plasma heating by waves with Difference- Frequency of two ICRF waves in GAMMA 10/PDX	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.16.2402045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryo SEKINE, Ryuya IKEZOE, Seowon JANG, Mafumi HIRATA, Makoto ICHIMURA, Mizuki SAKAMOTO, Shuhei SUMIDA, Koki IZUMI, Atsuto TANAKA, Yushi KUBOTA, Hiroki KAYANO and Yousuke NAKASHIMA	4. 巻 14
2. 論文標題 Observation of Density Fluctuations Originated from RF Waves with Two-Channel Reflectometer in GAMMA 10/PDX	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.2402011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koki IZUMI, Ryuya IKEZOE, Makoto ICHIMURA, Mafumi HIRATA, Mizuki SAKAMOTO, Shuhei SUMIDA, Seowon JANG, Atsuto TANAKA, Yushi KUBOTA, Ryo SEKINE, Hiroki KAYANO and Yousuke NAKASHIMA	4. 巻 14
2. 論文標題 Measurement of End-Loss Ions Originated from Spontaneously Excited High Frequency Waves by Using an MCP Detector on GAMMA 10/PDX	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.2402033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Seowon JANG, Makoto ICHIMURA, Mafumi HIRATA, Ryuya IKEZOE, Mizuki SAKAMOTO, Shuhei SUMIDA, Koki IZUMI, Atsuto TANAKA, Yushi KUBOTA, Ryo SEKINE, Hiroki KAYANO and Yousuke NAKASHIMA	4. 巻 14
2. 論文標題 Effect of the Potential of Confined Plasma on End-Loss Ion in GAMMA 10/PDX	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.2402032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryuya IKEZOE, Yushi KUBOTA, Makoto ICHIMURA, Mafumi HIRATA, Shuhei SUMIDA, Seowon JANG, Koki IZUMI, Atsuto TANAKA, Ryo SEKINE, Hiroki KAYANO, Yoriko SHIMA, Junko KOHAGURA, Masayuki YOSHIKAWA, Mizuki SAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA and Atsushi FUKUYAMA	4. 巻 14
2. 論文標題 A Full Wave Simulation on the Density Dependence of a Slow Wave Excitation in the GAMMA 10/PDX Central Cell with TASK/WF3D	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.2402003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 R. Ikezoe, T. Onchi, S. Jang, M. Ichimura, M. Hirata
2. 発表標題 Experimental evaluation of complexity of ions interacted with high-frequency waves in a mirror field
3. 学会等名 61th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 池添竜也、市村真
2. 発表標題 実験室高温ミラープラズマにおけるアルベンイオンサイクロトロン波動の励起とその役割
3. 学会等名 「実験室・宇宙プラズマ研究集会」「あらせサイエンス会議・解析ワークショップ」合同研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年 ~ 2020年

1. 発表者名 Ryuya Ikezoe, Seowon Jang, Koki Izumi, Makoto Ichimura, Mafumi Hirata, Takumi Onchi
2. 発表標題 Statistical analyses of a high-energy ion transport on GAMMA 10/PDX
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 池添 竜也、ジャン ソウォン、泉 昂希、市村 真、平田 真史、恩地 拓己
2. 発表標題 高温ミラープラズマ中の高エネルギーイオン輸送 に含まれる統計情報の抽出
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	恩地 拓己 (Onchi Takumi) (00727216)	九州大学・応用力学研究所・助教 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------